

エアワッシャ内での水滴の運動(初速度の大きさを変えた場合)

松藤久良*・飯嶋和明**・植村聡**・小関多賀美**

Motion of a Droplet in the Airwasher (Influence of the Initial Velocity)

Hisayoshi Matsufuji, Kazuaki Iijima, Satoshi Uemura and Takami Koseki

Motion of a droplet in the airwasher is studied theoretically. Single particle which starts from the origin at an arbitrary initial velocity under the uniform flow is considered. Particle is assumed to be small in size and spherical in shape. The interaction force between a particle and fluid was calculated from the Stokes drag law. Influence of the initial velocity on the droplet motion was examined. The particle does not apart from the origin so far in the direction perpendicular to the uniform flow, even when a particle starts at arbitrary initial velocity.

1. はじめに

半導体や液晶の製造工場であるクリーンルームでは、室内を清浄空間にするため、いわゆる、ヘパ(High Efficiency Particulate Airfilter: HEPA)といわれる高性能フィルタで循環空気をろ過し、空気中の塵埃を除去している。半導体の集積度があがるにつれ、高 cleanliness の管理のみでなく、今まではかえりみられなかった空気中に含まれるホウ素、アンモニア、硫黄酸化物、窒素酸化物などの微量なガス成分も歩留り低下の原因となるため、除去されるようになった。

一般には、これらのガス成分は活性炭やイオン交換樹脂からなるケミカルフィルタを用いて除去される。しかし混入量が微小とはいえ循環される空気の量が膨大なため、ケミカルフィルタの寿命が短いのが難点である。ケミカルフィルタの交換は空調の運転を停止する必要がある、24時間運転のクリーンルームでは年間を通して工場の停止期間が極めて少なく、寿命が来たフィルタをすぐ交換できないことも多い。またケミカルフィルタのコストが高いこと、寿命がきたフィルタが産業廃棄物となり、処理費用がさらにかかることが問題となる。何よりも、環境対策が大切な現在において、廃棄物の量を極力少なくするための弊害になっている。

そこで、ガス成分のうちアンモニアや二酸化硫黄などの水溶性のガスに対してはエアワッシャが用いられるようになった。エアワッシャを単独で使う場合と、安全のためにケミカルフィルタを用いるが、その前段にエアワッシャを設置しケミカルフィルタの長寿命化を図る場合とがある。

エアワッシャは、もともとは、夏の冷房のために高温の空気中に水を噴霧し、蒸発熱により空気の温度を下げ室内に送り込むために使われた。しかし、空気の温度は下がるものの湿度が高くなるため、初期の空調用には使われたが、フロンの発明とともに現在の冷凍機やエアコンにとって替われ、地下水の豊富な地域の工場で大雑把に冷房するような、一部の特殊な用途にしか使われなくなった。

* 機械工学科

** 三機工業株式会社

水を噴霧するノズルは散水用や加湿用など数多くの種類がある。ノズルメーカーも最近はクリーンルーム用のノズルを作っている。クリーンルームを対象にエアワッシャを考えると、噴霧する水の量、水滴の粒径、初速度、噴霧する方向などは大切である。このような分野では、ノズルメーカーの研究開発は行われているが、ほとんどが実機の試作と性能テストに集中しており、基礎的な研究は行われていない。

そこで、エアワッシャ内の水滴の運動を取扱うことにする。一つのノズルからは粒径の異なる水滴がある角度の範囲で噴霧されるが、ここでは、単一の水滴粒子の運動を考える。エアワッシャ内の定点から単一の水滴粒子を打出し、その水滴粒子が、打出される初速度の方向により、空気の流れによってどのような運動を行うかを調べる。今回は水滴粒子の初速度の大きさをいろいろ変えて、水滴を打ち出す場合を調べることにする。

エアワッシャで噴霧される水はクリーンルームの性質上超純水が用いられる。さらに、使用後の水に対しては排水処理が必要となる。このため、使用する水の量を減らすことは、超純水設備と排水処理設備を小さくすることができ、ケミカルフィルタの寿命を長くするとともに工場の環境問題の改善にも貢献をするものと期待される。

2. 方程式系

2.1 仮定

- (1) エアワッシャ内の流れは十分発達した乱流⁽¹⁾であるが、ダクト内の流れであるので、ノズルの形状とエアワッシャの壁面近くの境界層は無視し、流体は非圧縮の完全流体⁽²⁾とする。
- (2) 粒子は、球形で小さく、流体からストークスの抵抗法則⁽³⁾をうけるものとする。
- (3) 粒子の混入数は少なく、流体運動は、粒子の混入に影響されないとする。
- (4) 粒子の混入数は少なく、粒子間の相互作用は無視する。
- (5) 粒子は水滴であるが、運動中に変形したり蒸発したりせず、一定半径の球形のままとする。
- (6) 粒子は小さく、また運動する距離も長くなく、重力は無視する。
- (7) エアワッシャ内の流れを取扱うが、エアワッシャの壁ははるか遠くにあるものとする。

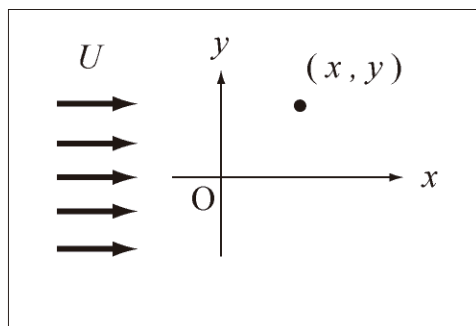


図 1 座標系

2.2 解析モデル

図 1 に示すように、粒子を打出す位置を原点とし、一様流の方向に x 軸を取り x 軸に垂直に y 軸をとる。粒子の位置座標を (x, y) とする。

2.3 支配する方程式

粒子の半径を R 、密度を ρ_p 、粒子の x 方向速度を u 、 y 方向速度を v 、流体の粘性係数

を μ 、流体の x 方向速度を u_f 、 y 方向速度を v_f とする。粒子は流体からストークス抵抗をうけるとすると、粒子の運動方程式は、

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_p \frac{du}{dt} = 6\pi\mu R(u_f - u) \quad (1)$$

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_p \frac{dv}{dt} = 6\pi\mu R(v_f - v) \quad (2)$$

となる。

また、粒子の軌跡を定める方程式は、

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \quad (4)$$

となる。

2.4 初期条件

粒子は原点から、初速度(u_0, v_0)で出発することになると、初期条件は、

$$\begin{aligned} t = 0: \quad & x = 0 \\ & y = 0 \\ & u = u_0 \\ & v = v_0 \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで、粒子の初速度を図2に示すように、初速度の大きさ V と x 軸からの打出す角度 θ とで与える場合を考える。

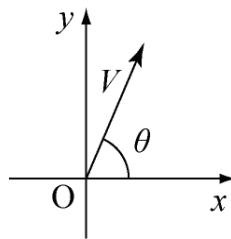


図 2 粒子の初速度

粒子の初速度は

$$\begin{aligned} u_0 &= V \cos \theta \\ v_0 &= V \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

3. 結果および考察

以下では、流体は空気とし、 $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 、粒子は水滴とし、 $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$ とする。また、流速は $u_f = 1.0 \text{ m/s}$ 、 $v_f = 0.0 \text{ m/s}$ 、粒子の大きさは、 $R = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ として、

粒子の初速度の影響について調べることにする。

3.1 代表的な粒子の運動

代表的な粒子の運動を図 3~7 に示す。初速度の大きさ $V = 10.0 \text{ m/s}$ で打出角度 $\theta = 60^\circ$ を選んだ。

図 3 は粒子の軌跡で、原点より $\theta = 60^\circ$ で打出した粒子は、初めは 60° の角度で進むが、 x 軸方向に吹く一様流の影響を受け徐々に運動方向が変わり、しばらくすると x 軸に平行に運動することがわかる。

図 4 は粒子の x 軸方向の位置座標で、時間の経過とともに x 座標が大きくなる。すなわち、時間が経てば下流にどんどん押し流されていく。運動開始後 1 秒以上では、直線状に大きくなるようである。

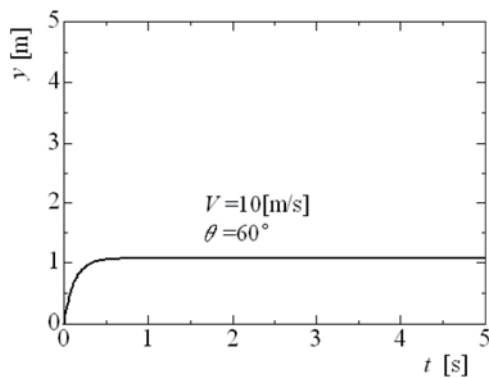


図 3 代表的な粒子の軌跡

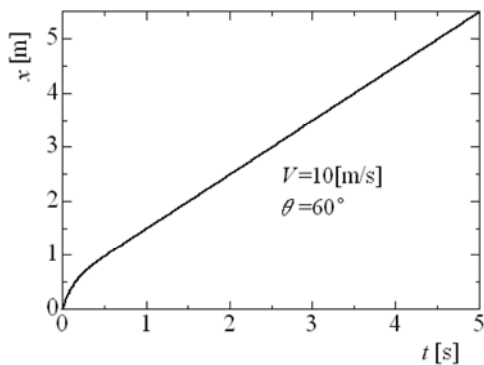


図 4 粒子の x 座標の時間変化

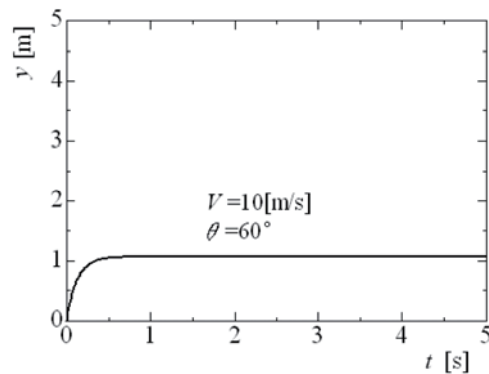


図 5 粒子の y 座標の時間変化

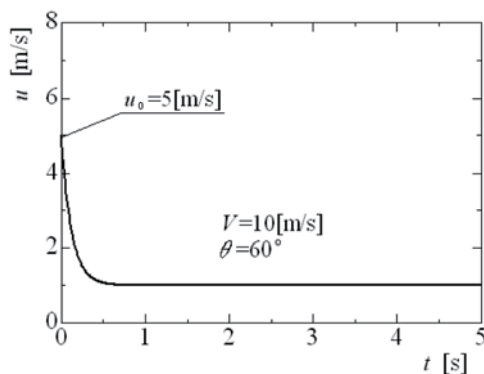


図 6 粒子の x 方向の速度の時間変化

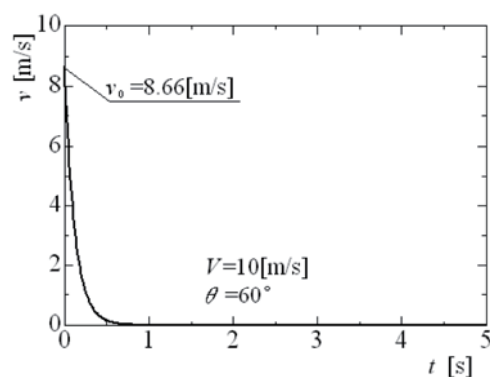


図 7 粒子の y 方向の速度の時間変化

図 5 は粒子の y 軸方向の位置座標で、初速度が 10.0 m/s とかなり大きな速度で 60° の角度に打ち出したが、 y 軸方向にはそれほど進まず、約 1 m 程度しか離れないことが分かる。1 秒も経たないうちに y 座標が一定の値になっている。ひとつのスプレーノズルから 60° の角度で 10.0 m/s の速度で半径 0.1 mm の水滴を打ち出すと、ダクト内の風速が 1.0 m/s のとき、約 1 m くらい水滴が拡散することになる。

図 6 は粒子の x 方向の速度で、 $\theta = 60^\circ$ のときの x 方向の初速度は $u_0 = 5.0 \text{ m/s}$ であるが、風速は 1 m/s であるため、ストークス抵抗がきき減速され、1 秒も経たぬうちに $u = 1 \text{ m/s}$ になる。粒子半径が 0.1 mm と小さいためだが、エアワッシャでは、細かい水滴を噴霧するため、ストークス抵抗が支配的となる。

図 7 は粒子の y 方向の速度で、 $\theta = 60^\circ$ のときは初速度 $v_0 = 8.66 \text{ m/s}$ である。ダクト内の y 方向の風速は 0.0 m/s なので、急激に減速される。約度 1 秒後には粒子の y 方向の速度は 0 m/s となる。

今回はエアワッシャを念頭に置き粒子の半径を $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ すなわち 0.1 mm とした。したがって、ストークス抵抗を強くうけ流体運動にすぐ追従していることがわかる。

3.2 粒子の軌跡に及ぼす初速度の影響

粒子の軌跡に及ぼす初速度の影響を図 8~11 に示す。初速度の打出角度 $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ を選んだ。初速度の大きさは $V = 1.0 \text{ m/s} \sim 100.0 \text{ m/s}$ の場合を示してある。

図 8 は $\theta = 45^\circ$ の場合で、原点より $\theta = 45^\circ$ で打出した粒子は、初めは原点より $\theta = 45^\circ$ で進むが、初速度の大きさは $V = 1.0 \text{ m/s}$ のときは x 軸のすぐ近くで x 軸に平行な軌跡を描く。 $V = 5.0 \text{ m/s}$ のときは $V = 1.0 \text{ m/s}$ のときよりは x 軸より離れるが、すぐに x 軸に平行な軌跡を描く。 $V = 10.0 \text{ m/s}$ のときはさらに x 軸より離れる。 $V = 50.0 \text{ m/s}$ のときは y 軸方向に約 4 m くらい離れる。極端な場合として、 $V = 100.0 \text{ m/s}$ のときで y 軸方向に約 9 m くらい離れその後 x 軸に平行な軌跡を描く。

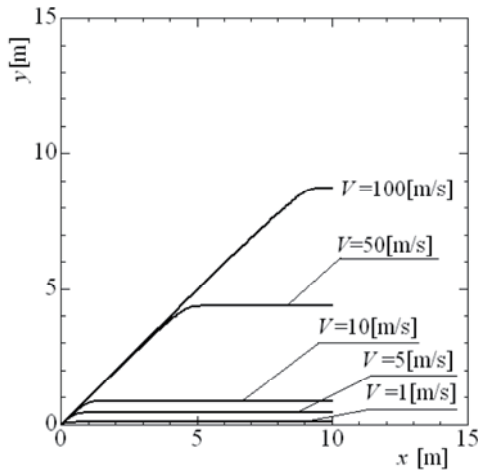
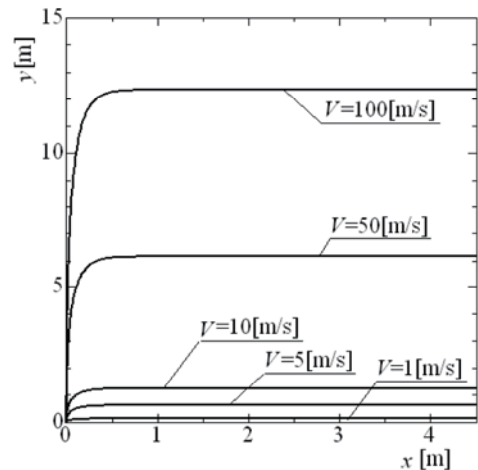
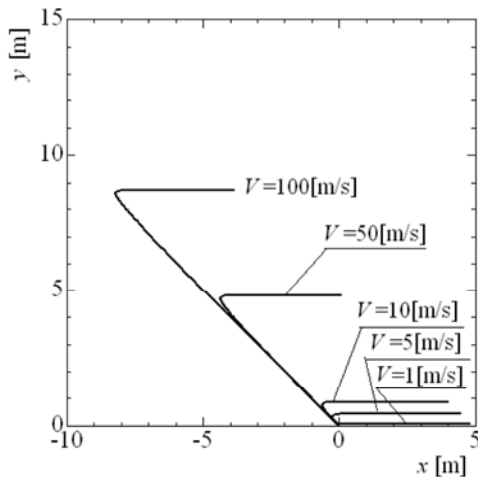
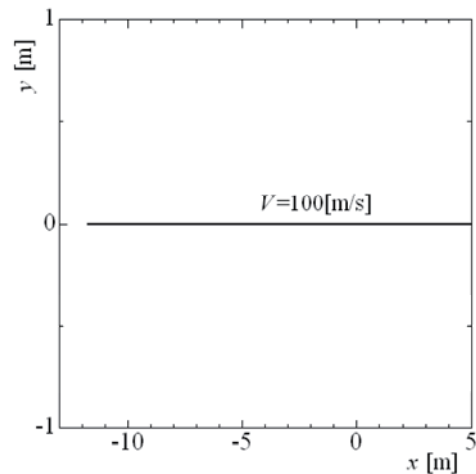
図 9 は $\theta = 90^\circ$ の場合で、原点より、 y 軸方向に運動する場合である。初速度の大きさを大きくするとより遠くまで粒子が到達する軌跡を描く。

図 10 は $\theta = 135^\circ$ の場合で、原点より、 x 軸の負の方向に運動する場合である。すなわち、対向流で打ち出した場合である。原点より斜め前方に 45° で進み風に押し戻され最後はダクト下流に向かう軌跡を描く。初速度の大きさが大きいほど、粒子はより上流まで到達し、また y 軸方向にも拡散する。

図 11 は $\theta = 180^\circ$ の場合で、原点より、 x 軸上を x 軸の負の方向に運動する場合である。 $V = 100.0 \text{ m/s}$ の場合を示してある。この場合上流に約 12 m ほど遡りその後下流方向に運動する。この図では、他の初速度のグラフは重なっている。

3.3 到達時間

エアワッシャでは噴霧された水滴が空気中のガス成分を吸収するために水滴と空気との接触時間が大切となる。エアワッシャは通常は下流側に水滴を除去するためのエリミネータを配置する。エリミネータでの気水の接触は無視して、ノズルからエリミネータまでの接触時間を考える。すなわち、粒子の出発から x_E 下流までを考えることにして、粒子が原点より x 軸の x_E に達するまでの時間を図 12 に示すように到達時間 T_E と定義する。ここでは、 x_E として、 1 m を選んだ。


図 8 粒子の軌跡 ($\theta = 45^\circ$ の場合)

図 9 粒子の軌跡 ($\theta = 90^\circ$ の場合)

図 10 粒子の軌跡 ($\theta = 135^\circ$ の場合)

図 11 粒子の軌跡 ($\theta = 180^\circ$ の場合)

打出し角度 $\theta = 0^\circ$ で打出された粒子の到達時間の初速度の大きさの依存性を図 13 に示す。図 13 より、初速度の大きさ $V = 0.0 \text{ m/s}$ で打ち出された粒子は 1 m の距離を進むのに 1.12 秒かかる。 $\theta = 0^\circ$ のときは原点より x 軸方向に運動するため、到達時間は初速度が大きいくほど小さくなる。初速度の大きさ $V = 10.0 \text{ m/s}$ のときは、約 0.18 秒、初速度の大きさ $V = 20.0 \text{ m/s}$ のときは、約 0.07 秒である。

打出し角度 $\theta = 90^\circ$ で打出された粒子の到達時間の初速度の大きさの依存性を図 14 に示す。図 14 より、 $\theta = 90^\circ$ のときは、 x 方向の初速度は 0.0 m/s となるので、初速度の大きさに係わらず粒子は 1 m の距離を進むのに 1.12 秒かかる。

打出し角度 $\theta = 180^\circ$ で打出された粒子の到達時間の初速度の大きさの依存性を図 15 に示す。図 15 より、 $\theta = 180^\circ$ のときは、原点より上流に向かって打ち出すので、初速度の大きさ $V = 0.0 \text{ m/s}$ で打ち出された粒子の到達時間は 1.12 秒であるが、初速度が大きいくほど、より上流まで運動するので、到達時間は大きくなる。初速度の大きさ $V = 10.0 \text{ m/s}$ のときは、約 2.3 秒、初速度の大きさ $V = 20.0 \text{ m/s}$ のときは、約 3.6 秒である。

図 13、図 14、図 15 より、到達時間は初速度の打出し角度が $\theta = 90^\circ$ のときは初速度の大きさにかかわらず一定になるが、 $\theta < 90^\circ$ のときは初速度の大きが大きくなると小さくなり、 $\theta >$

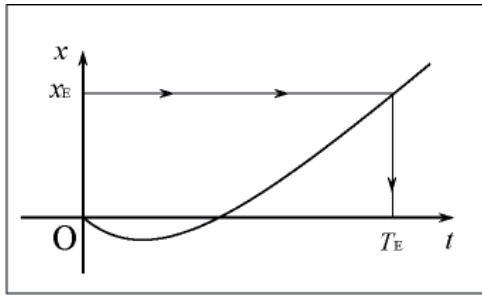


図 12 到達時間 T_E の定義

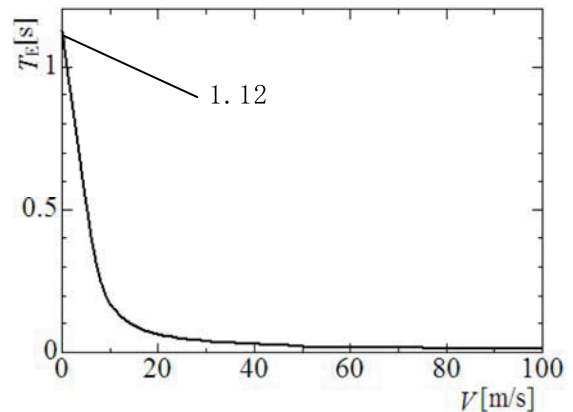


図 13 到達時間の初速度依存性 ($\theta = 0^\circ$ の場合)

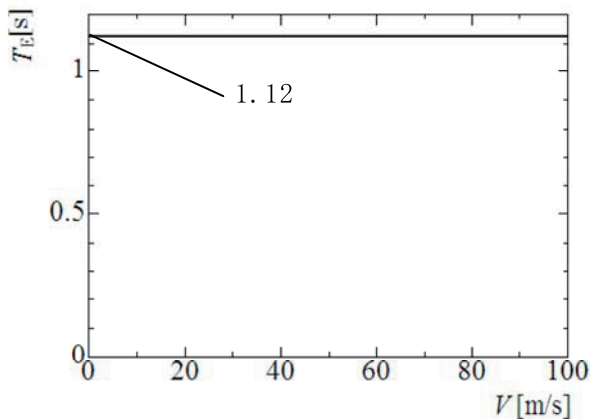


図 14 到達時間の初速度依存性 ($\theta = 90^\circ$ の場合)

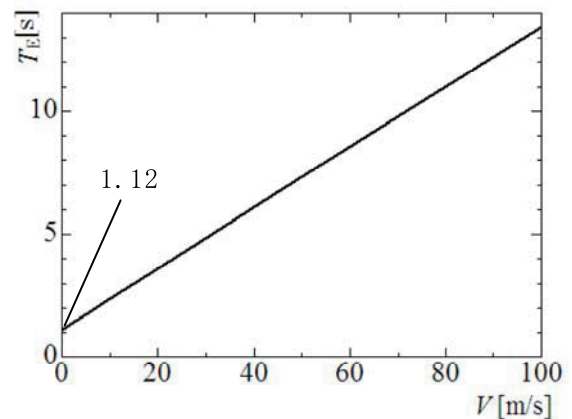


図 15 到達時間の初速度依存性 ($\theta = 180^\circ$ の場合)

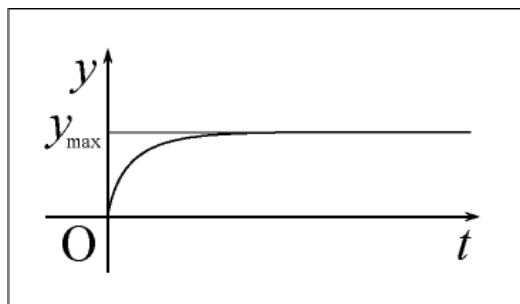
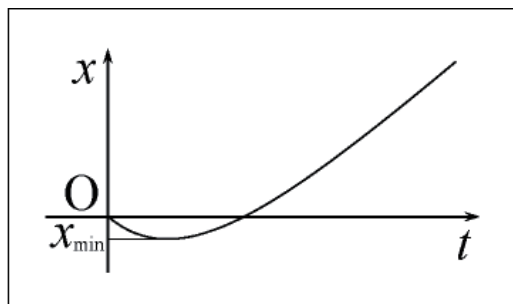
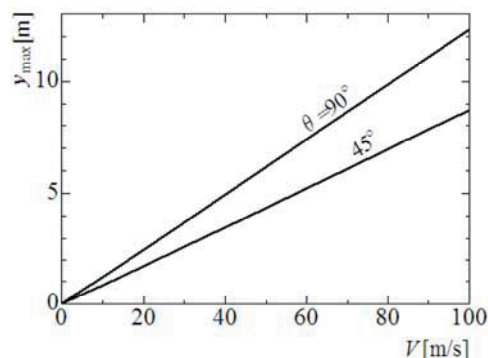
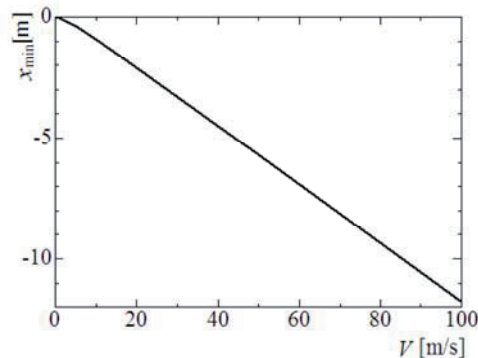
90° のときは初速度の大きさが大きくなると大きくなる。

3.4 到達距離

節 3.2、で粒子の軌跡を調べたが、初速度の大きさ V で x 軸からの打出す角度 θ で打出した粒子もストークス抵抗によりいずれ流体と同一の運動を行い y 方向にも x の負の方向にも限りなく移動することはない。すなわち、一個のスプレーノズルでは、 y 方向の水滴の広がりには限度がある。また、対向流にして、ダクトの上流に向かって水滴を噴霧しても、風のため押し戻され、上流に遡る距離に限度がある。したがって、図 16 に示すように、 y 方向に移動する最大の距離がある。この距離を到達距離 y_{\max} と定義する。また、図 17 に示すように、 x の負の方向に移動する最大の距離がある。この距離を到達距離 x_{\min} と定義する。

初速度の打出し角度 $\theta = 45^\circ$ と 90° の場合について、 y 方向の到達距離の初速度依存性を図 18 に、初速度の打出し角度 $\theta = 180^\circ$ の場合について、 x 方向の到達距離の初速度依存性を図 19 に示す。

図 18 より、初速度の大きさ $V = 0.0 \text{ m/s}$ で打ち出され粒子は初速度の y 方向の成分がないため、 x 軸上を運動するので、 y 方向の到達距離は 0 m となる。また、図 18 より、打ち出し角度 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ のときは初速度が大きくなるにつれて、 y 方向の到達距離は大きくなり、直線状に大きくなる。初速度を固定した場合は 45° のときよりも 90° のほうが、 y 方向の到達距離は大きい。初速度の大きさ $V = 10.0 \text{ m/s}$ の場合、 $\theta = 45^\circ$ のとき y 方向の到達距離は約 0.8 m となり、


図 16 y 方向の到達距離の定義

図 17 x 方向の到達距離の定義

図 18 y 方向の到達距離の初速度依存性

図 19 x 方向の到達距離の初速度依存性

$\theta = 90^\circ$ のとき y 方向の到達距離は約 1.3 m となる。実際のノズルの配置を設計する場合には、 y 方向の到達距離を考慮して、ノズルの間隔を決める必要がある。

図 19 より、初速度の大きさ $V = 0.0 \text{ m/s}$ のとき、下流に運動するので、 x 方向の到達距離は 0 m となる。初速度の打ち出し角度 $90^\circ < \theta$ のときは対向流で、上流に向かって噴霧するので、水滴の遡る最大値、すなわち、 x 方向の到達距離が存在する。初速度の大きさが大きくなるにつれて、 x 方向の到達距離も大きくなる。数学的には小さい値となる。 $\theta = 180^\circ$ のとき、初速度の大きさ $V = 10.0 \text{ m/s}$ の場合、 x 方向の到達距離は約 -1.0 m となる。初速度の大きさ $V = 20.0 \text{ m/s}$ の場合、 x 方向の到達距離は約 -2.1 m となる。実際のノズルの配置を設計する場合には、 x 方向の到達距離を考慮することにより、上流側にもエリミネータを設置するか否かを判断する必要がある。

4. おわりに

エアワッシャ内での水滴の運動を単一の水滴粒子に着目して理論解析した。水滴の初速度の大きさを調べて調べた結果、粒子の軌跡に及ぼす初速度の大きさの影響を明らかにし、水滴と空気の接触時間、流れに垂直方向の水滴の広がり、流れの上流方向の水滴の遡りなどを調べ、エアワッシャ設計のための基本的な知見を得た。

参考文献

- (1) Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, (1958), pp.116-120.
- (2) 今井 功, 「流体力学 (前編)」, 裳華房, (1979), p.86.
- (3) Saffman, P.G., *J. Fluid Mech.*, 13-1 (1962-5), p.120.

(平成 21 年 3 月 31 日受理)